

к.г.н., доц. Сикан Александр Владимирович
Российский государственный гидрометеорологический университет

Гидрологические расчеты

Часть II

лекция № 6

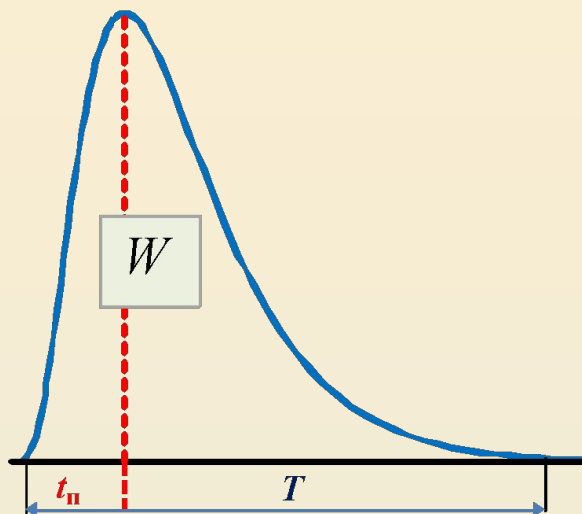
Основные темы лекции:

1. Расчет гидрографов половодий и паводков

- Основные элементы расчетного гидрографа
- Коэффициенты, характеризующие форму гидрографа
- Использование гидрографов наблюдаемых паводков в качестве типовых моделей
- Схематизация гидрографов паводков с помощью аналитических выражений и геометрических фигур.
- Метод изохрон.
- Метод единичного гидрографа и его модификации.
- Построение гидрографа с использованием интеграла Дюамеля



Основные элементы расчетного гидрографа



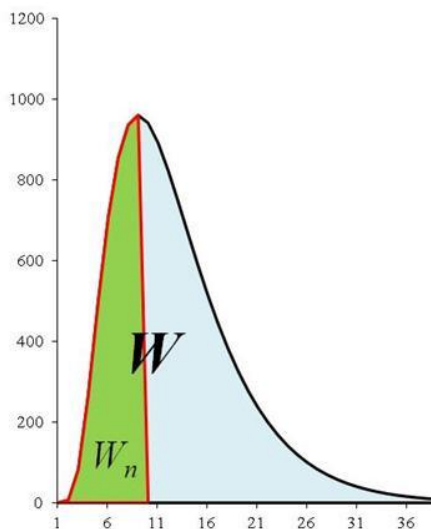
1. Слой (h) или объем стока (W) паводка (половодья)
2. Максимальный расход (Q)
3. Общая продолжительность паводка (T)
4. Продолжительность подъема паводка ($t_{\text{п}}$)
5. Форма гидрографа

По форме гидрографа различают единичные и многопиковые паводки.

Форма гидрографа зависит от времени добегания и изменения во времени водоотдачи и инфильтрации.

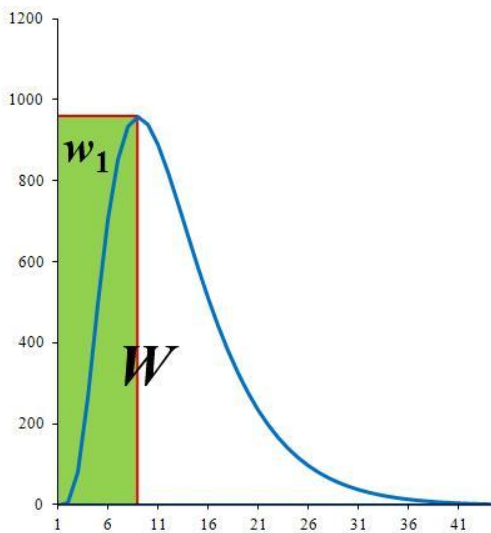
Коэффициенты, характеризующие форму гидрографа

*Коэффициент
несимметричности
и гидрографа*



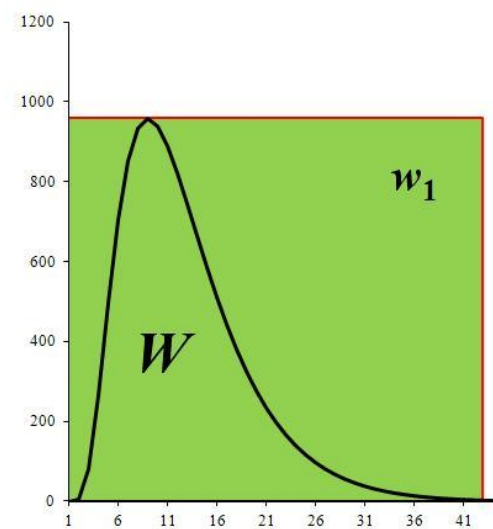
$$K_S = \frac{W_{\Pi}}{W} = \frac{h_{\Pi}}{h}$$

*Коэффициент
формы
гидрографа*



$$\lambda = \frac{w_1}{W} = \frac{q_{\max} t_{\Pi}}{0,0116 h}$$

*Коэффициент
полноты
гидрографа*



$$\gamma = \frac{w_1}{W} = \frac{q_{\max} T}{0,0116 h} = \lambda \frac{T}{t_{\Pi}}$$

Для средних и больших рек гидрографы строятся по среднесуточным расходам воды.

К мгновенным (или срочным) максимумам переходят с помощью коэффициента K_τ по формуле (1).

$$K_\tau = \frac{Q_{\text{МГН}}}{Q_{\text{СУТ}}} \quad (1)$$

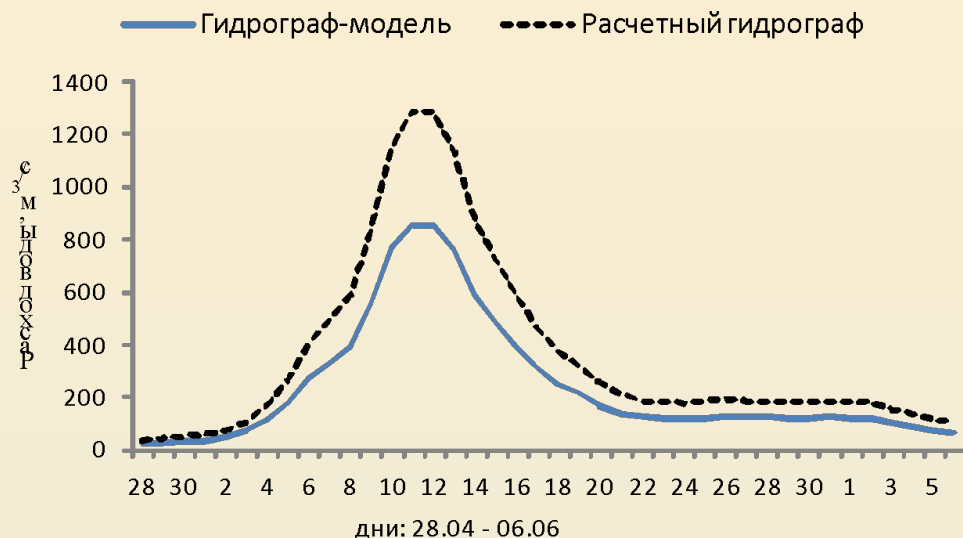
Тип реки	Коэффициент K_τ при площади водосбора, км ²							
	1	10	50	100	500	1000	2000	5000
<i>Равнинные реки</i> зоны тундры и лесной зоны	1,6	1,4	1,3	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
лесостепной и степной зон	4,0	3,0	2,0	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0
зоны сухих степей и полупустынь	6,0	4,0	2,5	2,0	1,5	1,4	1,3	1,2
<i>Горные реки</i> с весенне-летним половодьем	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1

Для малых рек где может наблюдаться большая разница между мгновенными и среднесуточными расходами строят гидрограф внутрисуточного хода стока.

Для построения расчетных гидрографов применяются следующие методы:

- Использование гидрографов наблюдаемых паводков в качестве типовых моделей.
- Схематизация гидрографов паводков с помощью аналитических выражений и геометрических фигур.
- Метод изохрон.
- Метод единичного гидрографа и его модификации.
- Методы математического моделирования.

Использование гидрографов наблюдаемых паводков в качестве типовых моделей



Ординаты гидрографа-модели умножаются на коэффициент K или K^* .

$$K = \frac{Q_{p\%}}{Q_{\max,м}} \quad (1)$$

$$K^* = \frac{h_{p\%}}{h_m} = \frac{W_{p\%}}{W_m} \quad (2)$$

$$Q_i = Q_{i,м} K \quad (3)$$

Если для расчета гидрографа на неизученной реке в качестве модели используется гидрограф реки-аналога, то учитывается разница продолжительности паводков путем умножения абсцисс гидрографа-модели на коэффициент K_t .

$$K_t = \frac{q_{м,а} \cdot h_{p\%}}{h_{м,а} \cdot q_{p\%}} \quad (4)$$

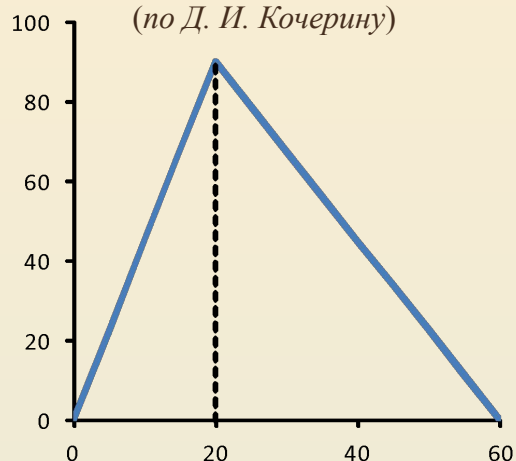
$$t_i = t_{i,м} K_t \quad (5)$$

q – максимальный модуль стока, $\frac{м^3}{с км^2}$; h – слой паводка, мм; t_i – время от начала паводка в сутках.

Схематизация гидрографов паводков с помощью аналитических выражений и геометрических фигур

Схематизация гидрографа по треугольнику

(по Д. И. Кочерину)



$$Q_t = Q_{\max} \left(\frac{t}{t_{\Pi}} \right)$$



для
подъема



$$Q_t = Q_{\max} \left(\frac{t_{\text{сп}} - t}{t_{\text{сп}}} \right)$$

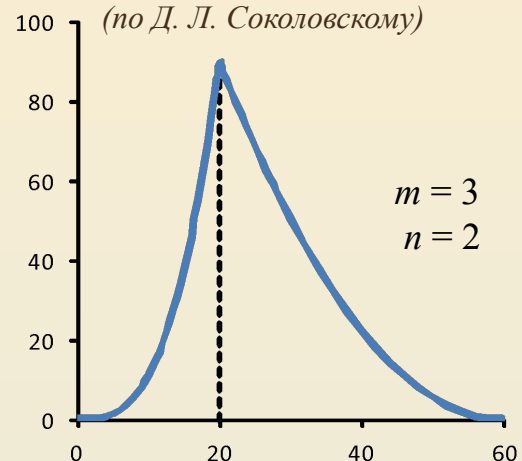


для
спада



Схематизация гидрографа в виде двух сомкнутых парабол

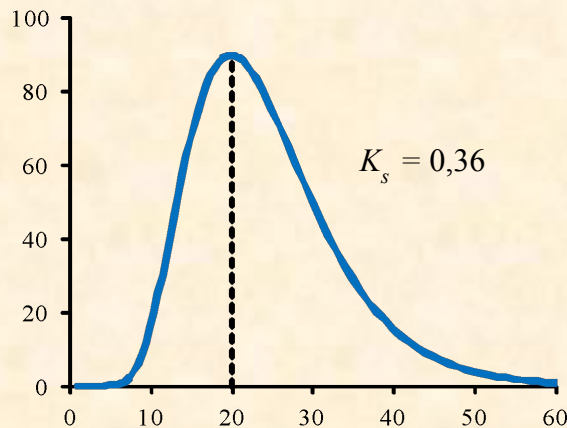
(по Д. Л. Соколовскому)



$$Q_t = Q_{\max} \left(\frac{t}{t_{\Pi}} \right)^m$$

$$Q_t = Q_{\max} \left(\frac{t_{\text{сп}} - t}{t_{\text{сп}}} \right)^n$$

Построение гидрографа по методу Г. А. Алексеева



Расчет гидрографа производится по формуле (1), где y_i и x_i – относительные координаты гидрографа, определяемые по формулам (2-3).

Условная продолжительность подъема паводка определяется по формуле (4).

Подставляя (2) в (1) получаем расчетное уравнение гидрографа в расходах (5).

$$y_i = 10^{-a \frac{(1-x_i)^2}{x_i}} \quad (1)$$

$$y_i = \frac{Q_i}{Q_{p\%}} \quad (2)$$

$$x_i = \frac{t_i}{t_{\Pi}} \quad (3)$$

Значения λ и a в зависимости от коэффициента несимметричности K_s

K_s	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44
λ	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,3	1,5	1,9	2,6
a	0,21	0,32	0,46	0,62	0,8	1,01	1,24	1,52	2,41	3,22	5,11	9,41

$$t_{\Pi} = \frac{0,0116 \cdot h_{p\%} \lambda}{q_{1\%}} \quad (4)$$

$$Q_i = Q_{p\%} 10^{-a \frac{(1-x_i)^2}{x_i}} \quad (5)$$

$Q_{p\%}$ – максимальный расход расчетной обеспеченности $P\%$, $\text{м}^3/\text{с}$;

$q_{p\%}$ – максимальный модуль стока расчетной обеспеченности $P\%$, $\text{м}^3/\text{с км}^2$;

$h_{p\%}$ – слой паводка (или половодья) расчетной обеспеченности $P\%$, мм.

t_{Π} – условная продолжительность паводка (или половодья) в сутках;

Относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды $y = Q_i / Q_{p\%}$ при различных коэффициентах λ и K_s (фрагмент таблицы из СП 33-101-2003)

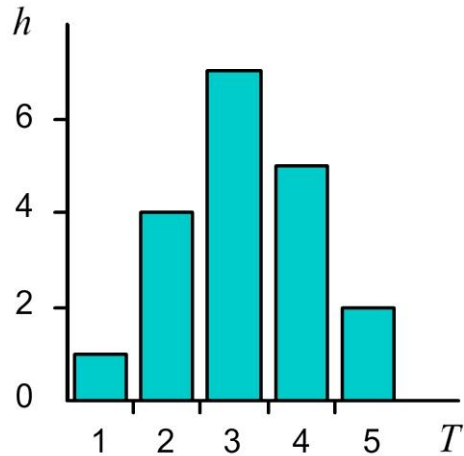
x_i	Значения параметра λ								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	...
0,1	0,023	0,002	0	0	0				...
0,2	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0	0	...
0,3	0,45	0,29	0,18	0,099	0,050	0,022	0,009	0,003	...
0,4	0,66	0,51	0,39	0,28	0,19	0,12	0,076	0,043	...
0,5	0,78	0,69	0,59	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	...
0,6	0,88	0,82	0,75	0,69	0,61	0,54	0,47	0,39	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4,0	0,34	0,19	0,092	0,042	0,016	0,005	0,002	0	...
5,0	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0		...
6,0	0,13	0,044	0,012	0,003	0				...
8,0	0,052	0,010	0,002	0					...
K_s	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	...

Переход к расчетным координатам гидрографа производится по формулам:

$$t_i = x_i t_{\Pi}$$

$$Q_i = y_i Q_{p\%}$$

Построение гидрографа по методу изохрон



$$Q_1 = f_1 h_1$$

$$Q_2 = f_1 h_2 + f_2 h_1$$

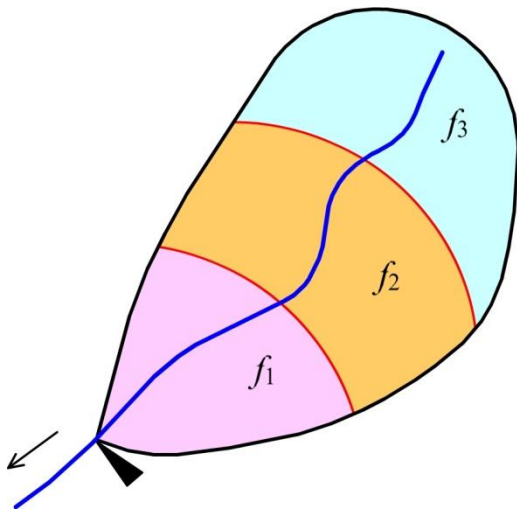
$$Q_3 = f_1 h_3 + f_2 h_2 + f_3 h_1$$

$$Q_4 = f_1 h_4 + f_2 h_3 + f_3 h_2$$

$$Q_5 = f_1 h_5 + f_2 h_4 + f_3 h_3$$

$$Q_6 = f_2 h_5 + f_3 h_4$$

$$Q_7 = f_3 h_5$$



Генетическая формула

стока:

$$Q_i = h_i f_1 + h_{i-1} f_2 + \dots + h_1 f_i = \sum_{k=1}^{k=i} h_k f_{i-k+1}$$

(1)

$h_1, h_2, \dots, h_n$ – ход дождя (или водоотдачи из снега) за вычетом потерь (при $\Delta t = \text{const}$).

$f_1, f_2, \dots, f_m$ – единичные площади, ограниченные смежными изохронами.

Для построения изохрон и определения площадей единичных площадок необходимо знать среднее время *руслового* добегания и среднее время *склонового* добегания. В первом приближении эти характеристики можно определить по таблицам 1 и 2.

Табл.1 – Ориентировочные значения $\bar{V}_p$ м/с

Характер реки и рельефа	Суходолы и малые реки	Средние и большие реки
Обычные равнинные	0,75-1,0	1,0-1,25
Предгорные или с холмистым рельефом	1,0-1,25	1,25-1,5

Табл.2 – Ориентировочные значения $\bar{V}_{ск}$ м/с

Тип гидрографа	Скорость
Дождевой паводок	0,25-0,50
Весеннее половодье при стекании под снегом	0,05-0,10

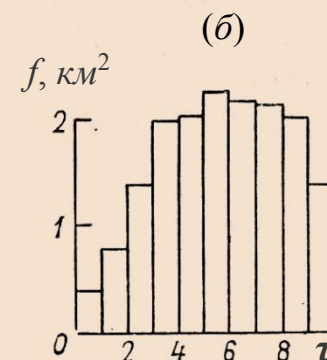
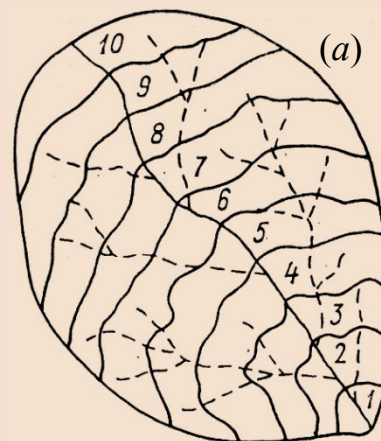
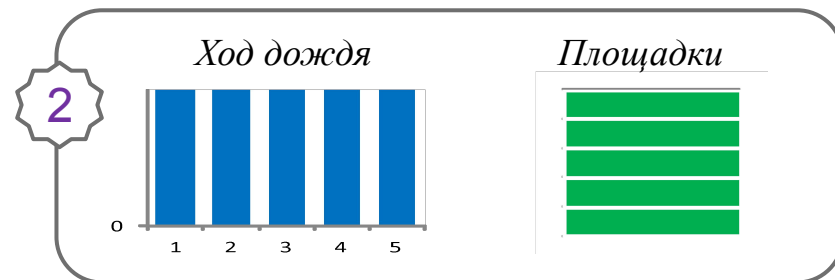
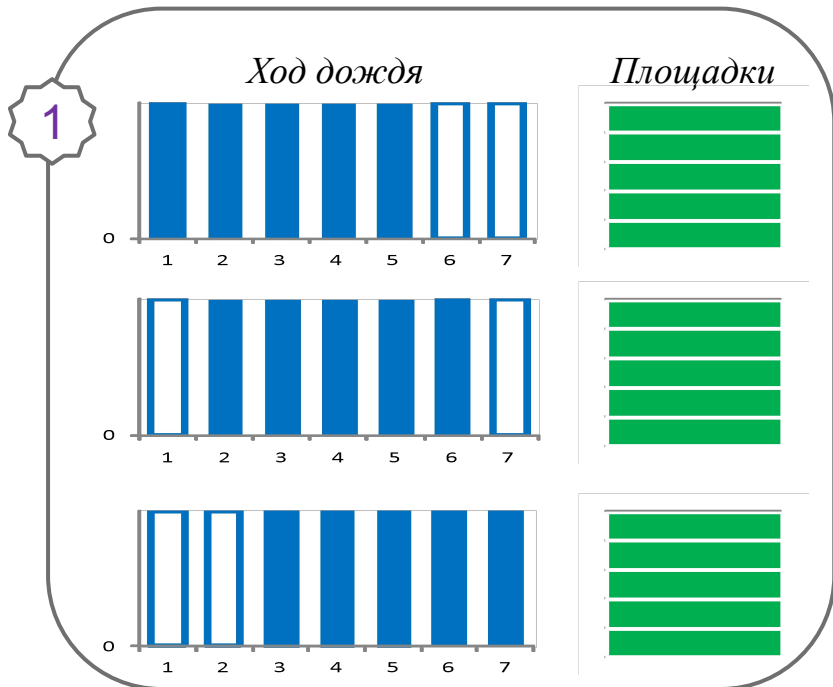


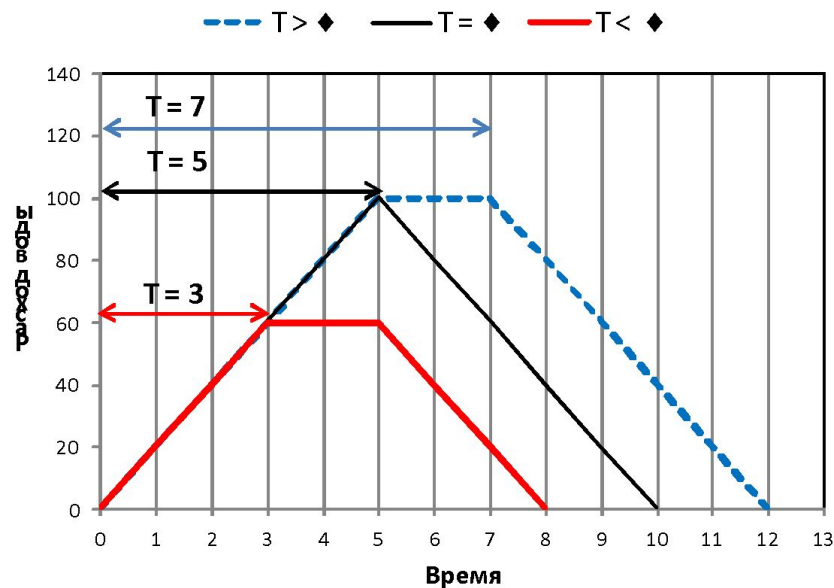
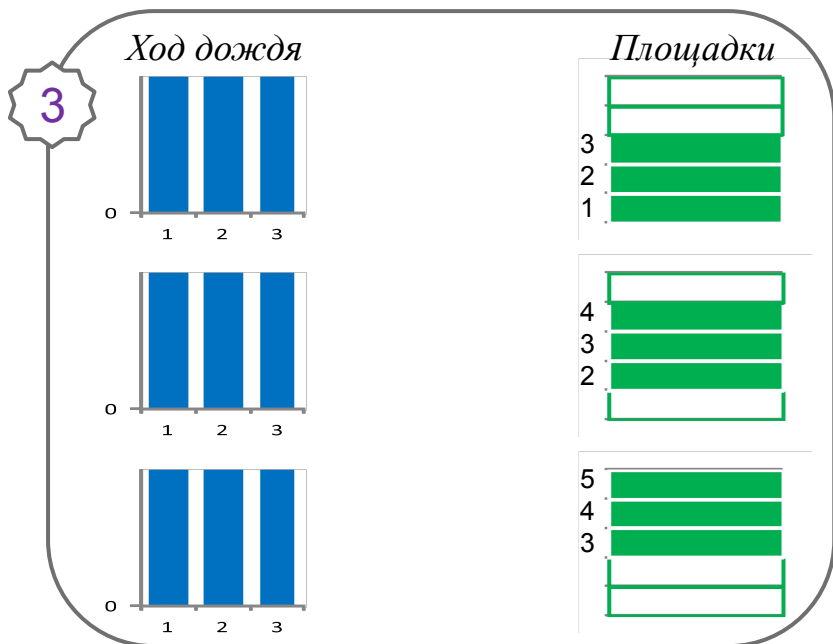
Схема бассейна с изохронами (а) и график распределения единичных площадей одновременного стекания (б).

Потери паводочного стока учитываются с помощью объемного коэффициента стока, α .

Формирование паводка на прямоугольном водосборе при постоянной интенсивности дождя (теория Долгова)



1. 7 порций осадков и 5 площадок ($T > \tau$)
2. 5 порций осадков и 5 площадок ($T = \tau$)
3. 3 порции осадков и 5 площадок ($T < \tau$)

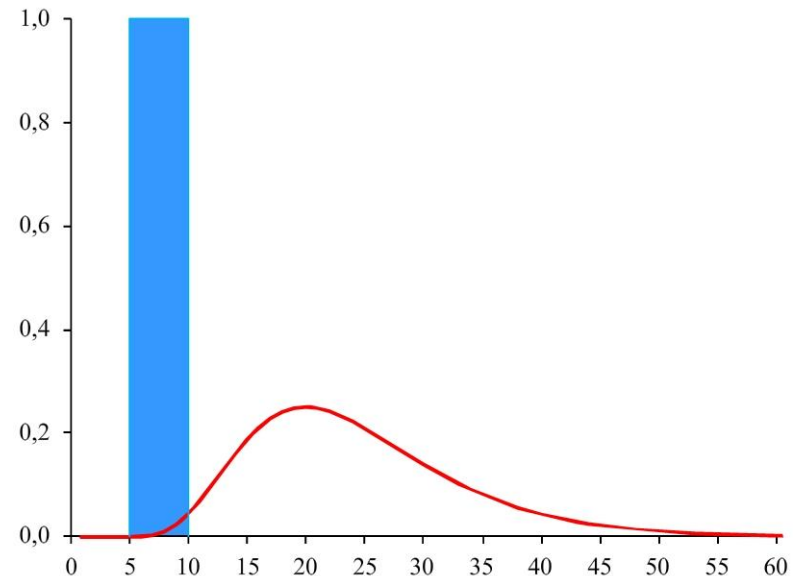


Метод единичного гидрографа

Под единичным гидрографом понимают гидрограф, сформированный единичной порцией эффективных осадков.

Под единичной порцией осадков понимают слой осадков равный одной единице (например одному дюйму) за интервал времени Δt .

Интервал времени Δt для каждого водосбора принимается постоянным и таким, чтобы Δt составлял 10-30% от времени подъема паводка.



Единичный гидрограф.

Если слой осадков не равен одному дюйму за Δt , то ординаты единичного гидрографа умножаются на величину этого слоя осадков.

Метод основан на гипотезе Шермана (1932) о том, что дожди одинаковой продолжительности дают гидрографы с одинаковыми основаниями.

Для получения единичного гидрографа строят несколько гидрографов от коротких изолированных ливней.

Ординаты полученных гидрографов переводят в относительные единицы, так, чтобы слой стока каждого паводка равнялся одному дюйму. Затем гидрографы осредняют.

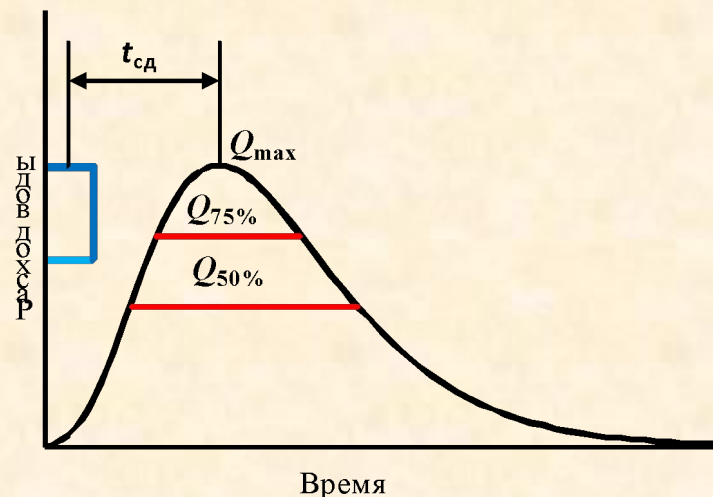
Расчетный единичный гидрограф получают путем сглаживания и корректировки осредненного гидрографа. Корректировка выполняется, чтобы слой стока единичного гидрографа равнялся одному дюйму.

Синтетический единичный гидрограф

При ограниченности и отсутствии исходных данных Снайдер предложил использовать «синтетический» единичный гидрограф.

Для его построения необходимы следующие данные.

- Время запаздывания пика паводка относительно центра ливня, $t_{сд}$
- Расчетный интервал времени, Δt
- Максимальный расход воды, Q_{max}
- Расход, составляющий 75% от Q_{max} и продолжительность его стояния
- Расход, составляющий 50% от Q_{max} и продолжительность его стояния



Синтетический единичный гидрограф
(по Снайдеру)

Перечисленные характеристики определяются по региональным зависимостям. Полученный схематичный гидрограф проверяется и корректируется так, чтобы слой паводочного стока был равен 1 дюйму (или другой принятой расчетной единице).

Построение гидрографа от нескольких порций осадков – метод сдвигки единичных гидрографов

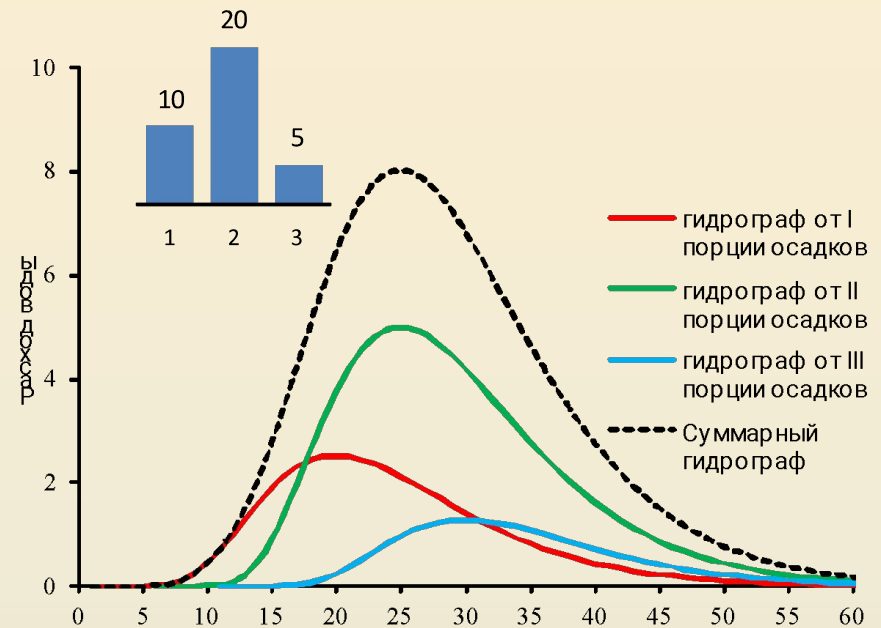
Если дождь состоит из нескольких порций осадков, то используется метод сдвигки единичных гидрографов.

В этом случае аналитическое выражение расчетного гидрографа можно представить формулой:

$$Q_i = h_i q_1 + h_{i-1} q_2 + \dots + h_1 f q_i = \sum_{k=1}^{k=i} h_k q_{i-k+1}$$

где h_i – ход эффективных осадков;

q_i – ординаты единичного гидрографа.



Гидрограф, сформированный тремя порциями осадков.

Построение гидрографа с использованием интеграла Дюамеля

Генетическую формулу стока и формулу, полученную на основе метода сдвигки единичных гидрографов можно свести к интегральной формуле:

$$Q(t) = \int_0^{\tau=t} h(t-\tau)P(\tau)d\tau, \quad (1)$$

Выражение (1) называют интегралом Дюамеля, а функцию $P(\tau)$ – функцией влияния, которая характеризует реакцию системы на единичный импульс.

Функцию $P(\tau)$ можно аппроксимировать двухпараметрическим Γ -распределением:

$$P(\tau) = \frac{\tau^{k-1}}{\theta^k \Gamma(k)} e^{-\frac{\tau}{\theta}}, \quad (2)$$

где e – основание натурального логарифма; $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция, для целых k : $\Gamma(k) = (k-1)!$; k – параметр формы ($k > 0$); θ – параметр масштаба ($\theta > 0$).

Параметры k и θ находят методом оптимизации, используя наблюдаемые гидрографы паводков и вызвавшие их эффективные осадки.

В российской практике инженерных расчетов для схематизации половодий и паводков применяются следующие методы (СП 33-101-2003):

1. **Использование гидрографов наблюденных половодий (или паводков) в качестве типовых моделей.** Этот метод применяется как при наличии, так и при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.
2. **Построение гидрографа по методу Г. А. Алексеева.** Метод применяется, как правило, при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

В зависимости от задачи, строится гидрограф, соответствующий расчетному максимальному расходу воды или расчетному слою половодья (паводка).

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные элементы расчетного гидрографа?
2. Какие коэффициенты характеризуют форму гидрографа ?
3. По каким расходам строятся расчетные гидрографы?
4. Какие геометрические фигуры и аналитические выражения используются для схематизации формы гидрографа ?
5. Как строится гидрограф по методу изохрон ?
6. Как меняется форма гидрографа на прямоугольном водосборе при постоянной интенсивности дождя в зависимости от соотношения продолжительности дождя (T) и времени добегания (τ) ?
7. Что такое единичный гидрограф ?
8. Как применить метод единичного гидрографа, если дождь состоит из нескольких порций осадков ?
9. Как используется интеграл Дюамеля при построении гидрографов?
10. Какие методы рекомендуются СП-33-101 для построения расчетных гидрографов ?

Конец лекции №6

Рекомендуемые материалы для изучения:

1. Владимиров А.М. Гидрологические расчёты: п. 13.
2. Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты: п.11.
3. СП 33-101-2003. «Определение основных расчетных гидрологических характеристик»: п.5.32-5.40, п.6.26-6.28, п.7.50-7.54.
4. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений: п.10.
5. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: п.8.3.